



헬리컬형 자기유체역학(MHD) 해수 추진기 소형 성능시험장치 개발

장두희[†]·조종갑·장대식·김선호·진정태·류창수
한국원자력연구원

Development of Small Performance Test Device for Helical-Type Magnetohydrodynamic (MHD) Seawater Propulsion Thruster

Doo-Hee Chang[†]·Jong Gab Jo·Dae-Sik Chang·Sun-Ho Kim·Jeong-Tae Jin·Chang-Su Ryu
Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A magnetohydrodynamic (MHD) seawater propulsion thruster has been proposed to reduce propeller noise, propeller pitting, and vessel vibration originated from the propeller cavitation. The MHD thruster was also focused to overcome the limitation of propulsion velocity for the special purpose of marine ships. The research trends and key technologies in the worldwide leading countries are reviewed for the development of MHD propulsion thrusters in Korea. A small performance test device was developed firstly with a conventional solenoid magnet of ≤ 0.6 Tesla and a helical-type cylindrical duct(inner diameter of 5 cm) of thruster. The artificial seawater was fabricated by a salt solution including a conductivity of 5~6 S/m. The measured flow velocity of artificial seawater in the test device was 0.03~0.42 m/s (0.06~0.84 Knot) with a magnetic field strength of 0.6 Tesla and the applied currents of 10~80 A including the change of anode materials. It was found that the flow direction of seawater was reversed by the directional change of applied current in the solenoid magnet.

Keywords : Magnetohydrodynamics(자기유체역학), Seawater propulsion(해수추진), Propulsion thruster(추진기), Helical-type thruster(헬리컬형 추진기), Seawater flow velocity(해수유속)

1. 서론

운영중인 선박과 함정(잠수함 포함)에서 통상적으로 사용하는 프로펠러 추진기는 선체진동과 프로펠러 구동소음이 특수목적의 함정에서의 핵심 해결과제로 대두되며, 이러한 진동과 소음의 감소를 목적으로 자기유체역학(Magnetohydrodynamics, MHD) 추진기(propulsion thruster)가 제안되었다. MHD 추진기는 전기장(electric field)과 자기장(magnetic field)에 의해서 유기되는 로렌츠힘(Lorentz force)을 이용하는 방식이며, 기술선도국(미국, 러시아, 일본, 중국, EU 등)에서는 미래 선박엔진으로 이용하기 위하여 국가적인 과제로 관련 연구를 수행하고 있다. 현재, 국내에서는 이에 대한 국가적인 기술개발 연구가 수행되지 않고 있으며, 실용화에 필요한 핵심요소기술 개발을 위한 기반연구도 전무하

다. MHD 추진기의 핵심은 추진체(propulsion hull)의 최적화, 고 자기장의 이용 및 출력효율 극대화에 있다. 추진기에 필요한 고자기장을 효율성이 높은 초전도자석으로부터 얻어 상용화가 가능한 선박용 추진엔진으로 개발하고자 노력하고 있으며, 이로부터 선체의 크기와 무게도 최적화시킬 수가 있다. MHD 추진기는 용이한 방향전환에 따른 기동력 확보가 가능하므로, 군사적인 특수목적의 소형 침투정과 잠수정에도 적용될 수 있으며, 추진기의 출력 성능에 따라 대형 선박과 잠수함의 (주/보조)추진엔진으로 활용될 수 있다. 또한, MHD 추진기는 저속운행이 필요한 대형 쇄빙선, 화물선, 예인선, 수중작업선, 시추선 및 유람선에도 적용이 가능하므로, 미래 수상 및 수중 선박용 차세대 엔진의 핵심기술이며, 개념적인 측면에서는 MHD 펌프(pump), MHD 발전(power generation), 로켓(rocket)과 우주선(space ship)의 추진기 개발을 위한 기반기술로 직접 활용이 가능하다.

1960년대 초반에 선박용 MHD 추진기의 이용에 대한 기본개념이 제안된 이후 (Friauf, 1961; Phillips, 1962), 기술개발 선도국(미국, 일본, 중국, EU 등)에서는 지속적인 기초연구와 응용개발이 진행되어 왔다. 연구 주도국들은 초기에 영구자석과 상자석을 사용하는 MHD 추진기 개발 연구로부터 최근에는 고자기장 초전도자석을 이용하는 추진기 개발에 관한 연구까지 지속적인 기술개발을 수행하여 추진기의 출력효율과 성능을 향상시켜 왔다. 일본은 1992년도에 세계 최초로 전장 30 m인 초전도 MHD 추진선박을 건조하여 시험운항에 성공하였다 (Takezawa et al., 1994; Takezawa et al., 1995). 국내에서는 1990년대 초반부터 2000년대 초반까지 이에 대한 기초 연구와 소규모 시험장치를 이용한 초전도 MHD 추진기 연구가 수행되었으나 (Kong, 1993a; Lee et al., 1995; Lee et al., 1998), 2000년대 이후부터 현재까지도 상용화에 필요한 고효율 MHD 추진기 기술개발 연구는 중단되고 있다. 초전도 MHD 추진기는 추진선박의 출력효율을 상용화 단계까지 올려줄 수 있는 핵심기술이며, 기동성이 요구되는 군사적인 특수목적의 선박과 함정에 적용되기 위해서는 초전도 MHD 추진기 핵심기술의 자력확보도 반드시 이루어져야 한다. 기술개발 주도국들의 전문가 분석에 의하면, 20 테슬라(Tesla, T) 이상의 자기장을 사용하면 초전도 MHD 추진기의 이용에 경제성이 있다고 판단하고 있다 (Ezzart, 1991; Rodrigues, 1999; Yan et al., 2002). 현재는 전 세계적으로 고온 초전도체의 개발과 고자기장용 대형 초전도자석 시스템의 상용화는 활발하게 이루어지고 있으며, 고온 초전도자석 시스템에 이용되는 냉각장치 구조의 단순화도 함께 진행되고 있다.

고효율의 초전도자석을 이용하는 초전도 MHD 추진기의 상용화에 필요한 핵심기반기술을 확보해야 하며, 관련 연구도 지속되어야 한다. 기술개발 주도국들은 국가의 군사전략적 차원에서 초전도 MHD 추진기를 활발하게 연구하고 있으나, 현재까지는 이에 관한 기술들을 제한적으로 일부만 공개하고 있다. 더욱이, 상용화에 필요한 핵심기술 개발에 성공하게 되면, 이에 대한 연구 내용과 결과들은 전혀 공개되지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 국내에서도 이에 대한 이론적 해석 및 핵심요소기술의 자체적인 개발과 시험이 국가적인 차원에서 지속될 필요가 있다. 특히, 고자기장 조건에서의 해수유동해석과 자기유체동력학적 특성에 관한 연구는 자기유체역학(MHD) 활용기술 확보를 위한 필수적인 연구분야이다.

본 연구에서는 MHD 추진기술에 대한 국내·외에서의 연구동향을 파악하여 소개하며, 최근에 국외에서 주로 연구되고 있는 헬리컬형(helical-type) MHD 추진기(propulsion thruster)의 기반기술 확보를 위해 자체 개발한 헬리컬형 MHD 추진기 소형 성능시험 장치로부터 추진기의 해수추진 특성을 국내에서 처음으로 확인하였다.

2. 국내·외 연구 동향

2.1 국내 연구

1990년부터 1994년까지 국방과학연구소(ADD)는 포항공과

대학과 공동으로 초기 MHD 추진기 구조인 사각덕트형(rectangular-duct type)과 경기장형(race-track type)에 대한 연구와 소규모 실험을 수행하였다. 이 연구에서는 잠수체 MHD 추진을 위한 이론적 기초와 실험기법을 정리하고, MHD 추진의 실용화에 대한 가능성을 분석하고 검토하며, 기술적인 문제점을 규명하여 해결방안을 제시하고자 하였다 (Lee et al., 1995; Kong, 1993b; Kim, 1991). 1994년부터 1997년까지는 이전 연구에 대한 후속 연구과제로 MHD 추진에 필요한 기반 요소기술의 축적을 목표로 하여 MHD 덕트의 유동해석과 덕트를 포함한 잠수체 주위의 유동 및 유체동력의 예측방법을 개발하고, MHD 추진용 초전도자석(경기장형: race-track type, 분극 자석)의 개념설계를 수행하였다. 1994년부터 1999년까지 삼성중공업과 포항공과대학이 공동으로 3.5 T의 전형적인 말안장형 분극자석(saddle-type dipole magnet, 미국 Supercom사 선재 사용 및 중국 IEE의 주문 제작)을 사용하는 초전도 MHD 추진기 개발 연구를 수행하였다 (Jeoung, 1997; Sohn et al., 1998). 이 연구에서는 MHD 추진덕트내의 압력분포와 유속을 측정하고, 기존의 상자석을 이용한 결과와 비교하였으며, 여기서 계산된 이론적인 추진효율은 약 8 %였다. 이후, 국내에서는 MHD 추진기의 출력성능을 향상시키기 위한 보다 체계적인 시험장치의 개발연구는 지속되지 못하였다.

2.2 국외 연구

MHD 추진에 대한 기본적인 이론은 1961년 Friauf에 의해 사각덕트형 MHD 추진기가 처음으로 제안되었고 (Friauf, 1961), 1962년 Phillips에 의해서 처음으로 해양 운송수단용 동력의 개념이 평가된 이후 (Phillips, 1962), 기술주도국에서는 지속적으로 이에 대한 기초적인 연구개발을 수행하였다. Doragh (Doragh, 1963)와 Doi (Doi et al., 1968)는 당시에 실현이 어려웠던 10 테슬라 자기장 세기의 초전도자석을 MHD 추진에 이용하자고 제안하였다.

1966년 미국 Westinghouse사의 Way는 MHD 추진 모형선으로 실험을 수행하여 이론의 합리성을 입증하였다. Way는 미국의 California Santa Barbara 대학에서 길이 3.1 m, 반경 0.225 m, 자기장의 세기 0.015 Tesla(T)의 추진기(EMS-1)를 개발하여 0.4 m/s의 속도로 20분간의 운전에 성공하였다 (Way, 1968). 이후, 1970년대에는 극저온 냉동기(cryogenics)의 발달로 MHD 추진기에 초전도자석을 이용하려는 시도가 진행되었으며, 1970년대 후반에는 일본에서 초전도형 MHD 추진에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 1978년 Kobe 대학의 Saji와 Kitano는 길이 1 m, 중량 6.5 kG, 최대 자기장 세기가 1.0 T인 모델선(SEMD-1)을 개발하여 0.15 N의 추진력과 약 0.1 %의 추진효율을 얻었으며, 이 결과를 바탕으로 길이 85 m, 중량 10 kton의 잠수함용 추진탱크를 설계(SEMD-4A)하여 8×10^5 N의 추진력과 약 50 %의 추진효율을 얻으려 하였다 (Saji et al., 1978). 1979년에 Iwata와 Saji는 초전도자석을 이용하여 길이 3.6 m, 자기장의 세기 2.0 T의 초전도형 MHD 추진기(ST-500)를 개발하여 0.6 m/s, 20 N의 출력성능을 달성하였다 (Iwata et al., 1980). 1984년 Tada는 추진체(Thruster

hull) 바닥에 12개의 추진기(Thruster)가 달린 길이 80 m, 실효 추진길이 10 m, 자기장의 세기 2.7 T, 출력효율 0.1인 쇄빙선 (Icebreaker)을 설계하였다 (Tada et al., 1984). 이 설계에서는 -269 °C에서 유지되는 액체헬륨(LHe) 냉각방식의 초전도자석을 이용하였으나, 액체헬륨을 유지시켜주는 열차폐체(Cryostat) 설계의 복잡성이 해결 상의 어려움이였다.

1987년에는 임계온도 92 °K인 구리산화물 세라믹 고온초전도체가 개발되어 10~20 T정도의 자기장을 생성하는 초전도자석이 상용화되었다 (Yan et al., 1995; Kiyoshi & Wada, 2003; Stumberger et al., 2004). 1987년 일본에서는 국가적인 연구과제로 초전도 MHD 추진기가 실물형태의 선박모형으로 건조되기 시작하여 1990년대 초에 완성하였다. 이 선박은 무게 150 ton, 자기장의 세기 4 T, 추진력은 8,000 N, 최대 속도 8 Knot이다. 일본은 1992년에 세계 최초로 초전도형 MHD 추진기를 사용한 수상선박 (YAMATO-1)을 Kobe 앞바다의 해수면에서 항해시키는데 성공하였다 (Matora et al., 1991; Takezawa et al., 1995). 이 YAMATO-1은 최고 속도 4 m/s, 추진효율은 1.7 %로 기존의 프로펠러 추진기보다는 매우 낮은 출력성능을 보여주고 있다. 1999년부터 일본과 중국은 공동연구로 자기장 세기가 14 T인 헬리컬형 (helical-type) 초전도 MHD 추진기를 개발하고, 추진기 성능시험과 고자장하에서의 해수 전기전도도 특성 등에 관한 연구를 수행하였다 (Nishikawa et al., 2000; Takeda et al., 2005). 이 추진기의 규격은 길이 0.6 m, 내경 0.346 m, 헬리컬 피치수 3.8이며, 자기장 세기를 3~14 T까지 단계적으로 높이며 실험을 수행하였다. 이 연구에서의 이론적인 추진효율은 60 %이지만, 실험적인 추진효율은 13 % (Load factor=2.6)로 낮은 결과를 얻었기 때문에, 이후에는 Kobe 대학에서 7 T급의 초전도 MHD 실험장치를 이용하여 추진효율을 높이기 위한 연구를 양국이 공동으로 수행하였다 (Liu et al., 2006). 1993년에 미국 아르곤연구소(ANL)에는 6 T의 자기장을 가지는 초전도 MHD 추진기를 개발하였으며, 이 추진기의 초전도자석은 13 feet의 분극형(dipole type)이며, 전체 무게가 173 ton으로 본래는 핵융합연구용으로 제작되었던 것을 이용하였다 (Pasha Publication, 1989). 1995년 Pennsylvania State University에서는 MIT 대학에서 개발한 12 T급 초전도자석을 이용한 초전도 MHD 추진 시스템을 개발하여 추진실험을 수행하였으며, 전기적인 효율이 약 20 %이고, 추진효율은 약 7 % 정도였다 (Lin & Gilbert, 1989).

일반적으로, MHD 추진기용으로 이용되는 영구자석 (permanent magnet)은 최대 2 T 정도까지 자기장의 세기를 높일 수 있으며, 분극자석(Dipole magnet)은 최대 6 T 정도까지 높일 수 있다. 최근에는 자기장 세기를 보다 높이기 위하여 헬리컬형(Helical-type) 초전도자석을 MHD 추진기 연구에 이용하고 있다 (Chen et al., 2019a; Haghparast & Pahlavani, 2019; Chen et al., 2019b). 미국과 영국의 군사전문가들은 (구)소련에서 1980년대 후반부터 Victor III, Sierra, Akula급 공격용 핵잠수함의 동체 일부분에 MHD 추진장치를 이미 장착했다고 믿고 있다(Gilbert & Lin, 1991). 이 추진기는 길이 29.5 피트, 외경 8.2 피트, 내경 2.5 피트, 속력은 7 Knot 정도로 평가되고

있다. 미국의 Los Angeles급, Ohio급과 러시아의 Alfa급 핵잠수함에서는 15 Knot 이상의 속도에서 기어-터빈으로부터 발생하는 소음을 감소시키는 것이 주요 과제였기에 이에 대한 대안으로 MHD 추진기의 이용을 제안하였으며, 기술주도국들은 이에 대한 연구개발에 많은 노력과 투자를 집중하였다. 기술주도국에서는 MHD 추진기의 고속운전에 대한 필요성뿐만 아니라, 화물 운반선과 유람선, 쇄빙선 등의 저속운항이 필요한 대형선박 엔진으로의 활용에 대하여도 검토하고 있다. 2003년 중국의 Han과 Liu는 소형원자로(small liquid sodium cooled reactor)와 AMTEC(Alkali Metal Thermo-Electric Converter) cell로부터 발생하는 전기에너지를 초전도 MHD 추진기의 전원장치에 직접 공급하는 방식을 채택하는 새로운 개념의 MHD 선박 추진시스템을 제안하고, 많은 장점이 있음을 강조하였으며, 이러한 방식은 MHD 추진기가 미래의 해양선박 추진엔진이 되기 위한 발전방향을 제시하고 있다 (Liu, 2003; Lodhi & Dalogu, 2001).

3. 자기장 세기와 추진기 효율의 상관관계

아래의 Fig. 1은 전형적인 헬리컬형 추진기(helical-type thruster)의 개념도이며, 추진기 내부에는 일정한 헬리컬 피치 (helical pitch)를 갖는 절연벽(insulation wall)을 갖추고 있다. 추진기의 입·출구단에 유동유도기(flow guide)와 유동정류기 (flow rectifier)를 연결하여 유속을 약 10 % 정도까지 증가시킬 수 있다 (Takeda et al., 2006).

폐쇄형 해수 순환장치에서 이상적인 MHD 추진기를 고려하여 추진기 내부의 전위강하 손실(potential drop loss)과 수력학적 손실(hydraulic loss)이 없다는 가정과 전형적인 전자기효율 (electromagnetic efficiency) 방정식으로부터 자기장 세기와 추진기 효율의 간단한 상관관계를 구하면 Fig. 2와 같다 (Peng et al., 2002). 여기서, 해수 전기전도도는 5 S/m, 해수에 인가되는

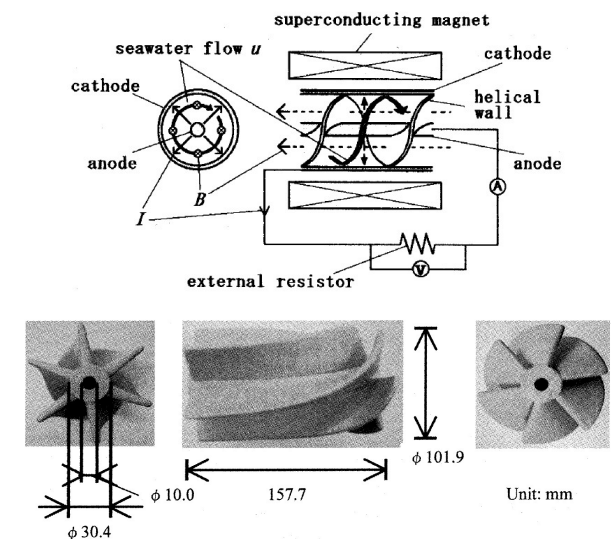


Fig. 1 Conceptual drawing of Helical-type thruster and photographs of flow rectifier in Japan

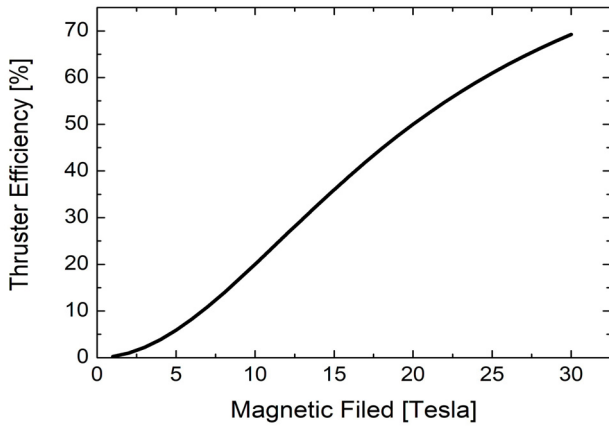


Fig. 2 Theoretical relationship between thruster efficiency and magnetic field strength

전류밀도는 2 kA/m^2 , 해수 추진속도는 자기장 세기와 동일하다고 가정하였다. 추진기 효율은 자기장의 세기에 비례하여 증가되지만, 실험적으로는 추진기내의 여러 손실인자들로 인하여 효율은 감소한다 (Yan et al., 2002). 현재, MHD 추진기 기술선도국들은 이러한 효율감소를 해결하기 위하여 활발한 연구를 수행하고 있으며, 국내에서도 실용화에 대비하여 이에 관한 연구수행이 절실하게 필요하다. 특히, 추진효율을 높이기 위해서는 자기장의 세기를 가능한 높여주어야 하며, 추진기 양단에 효율적인 유동유도기(flow guide)와 유동정류기(flow rectifier)를 연결하여 수력학적 손실(hydrodynamic loss)을 감소시켜 주고, 전극 사이에 가능한 많은 전류를 인가할 수 있도록 연구를 진행 중이다 (Hales et al., 2006; Takeda et al., 2015; Chen et al., 2019b; Cao et al., 2021).

4. 소형 MHD 추진 성능시험장치

4.1 상전도 전자석

MHD 추진기에 사용되는 자기장의 세기는 강할수록 추진기의 추진력이 높지만, 소형 성능시험장치를 이용한 기초실험을 위하여 최대 0.6 T의 자기장 세기를 갖는 상전도(Cu) 전자석을 국내 기업체와 함께 설계하여 제작하였다. 아래의 Fig. 3은 최종적으로 설계한 솔레노이드형 상전도 전자석의 구조이다. 개발한 상전도 전자석의 내경은 70 mm이고, 코일이 감겨진 길이는 130 mm이다. 코일은 총 252 turn이며, 최대 0.6 T를 만들기 위해서 262 A/20 V의 전력과 3.8 liter/m의 냉각수 순환이 필요하다.

Fig. 4는 전자석을 제작한 후에 측정한 자석 내부의 중심축에 따른 자기장 세기의 분포이다. 전자석의 중심과 코일이 감긴 외곽부에서는 자기장 세기가 약 2배 정도의 차이를 보여주고 있으며, 코일 외부에는 20 mm 두께의 자기장 차폐구조가 조립되어 있다. 이 자기장 차폐구조 외부에는 누설 자기장 세기가 0.05 T(500 G) 이하이며, 전자석과 멀어질수록 급격하게 감소됨을 확인할 수 있다.

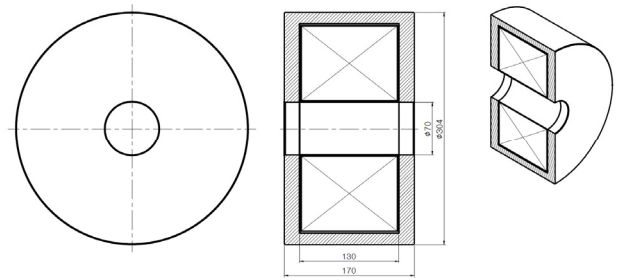


Fig. 3 Design structure of solenoid Cu-magnet with a maximum magnetic field strength of 0.6 T

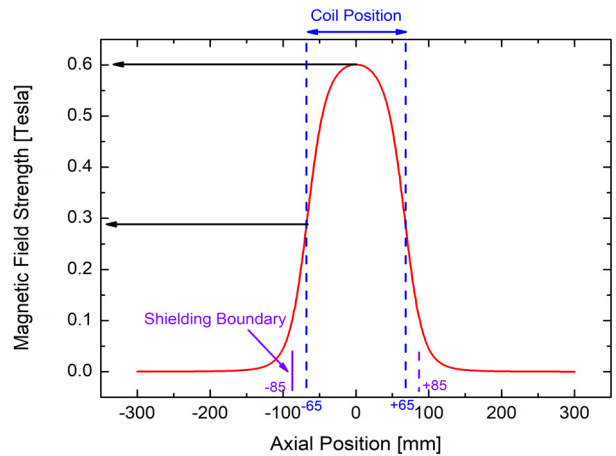


Fig. 4 Axial profile of magnetic field strength along the central line of solenoid Cu-magnet

4.2 전자기장(EM) 전산유체해석

MHD 추진 성능시험장치를 제작하기에 앞서, 단순모형의 헬리컬 추진기에 대한 전자기장(Electromagnetic fields, EM) 전산유체해석(CATIA CAD modeling, ANSYS ICEM-CFD meshing, ANSYS CFX EM analysis)을 상용 프로그램으로 수행하였고, 헬리컬 추진기의 해수 추진속도를 예측하였다 (Liu et al., 2006; Zhao et al., 2012; Haghparast et al., 2019.). 인공해수 (전기전도도:

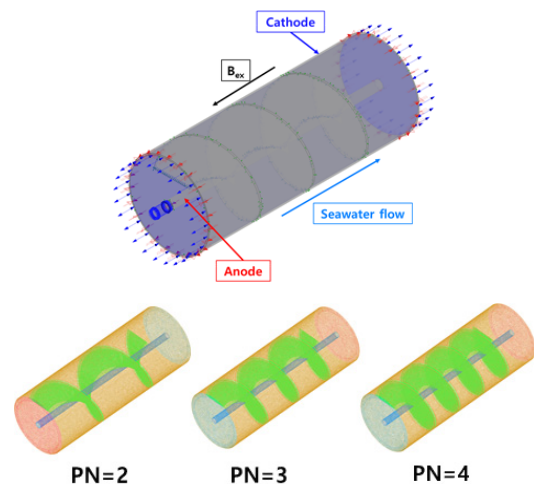


Fig. 5 Modeling structure of a helical MHD thruster

5.0 S/m)에 대해서 내부에 스크류(Screw) 형태의 절연구조를 갖는 헬리컬 추진기(Helical thruster)의 피치수(Pitch number, PN)를 2, 3, 4로 변경하면서 해석하였다. Fig. 5는 모델링에 사용한 헬리컬 MHD 추진기의 구조이다. 여기서, 자기장은 해수 유동방향과 반대로 흐르는 경우이다.

자기장 세기 0.6 T, 추진기 내경 5 cm, 피치수 2, 3, 4(Helical length=100 mm, 전·후방 Flow guide 길이=50 mm), 인공해수 전도도 5 S/m(저항률 0.2 ohm-m)에서 인가전류 세기(20 A, 40 A, 60 A, 80 A, 100 A)에 따른 추진기 출구단의 해수유속을 계산하였다(Fig. 6 참조). 이 계산결과로부터 전극의 인가전류가 60 A 일 때에 추진기 출구에서의 해수 분사속도는 0.044 m/s(~0.088 Knot)이고, 100 A 일 때에는 0.073 m/s(~0.146 Knot)임을 확인하였다. 따라서, 추진기 출구단에서의 해수속도가 가장 크게 계산되는 피치수 2를 갖는 헬리컬 절연구조로 MHD 추진기 내부를 제작하였다.

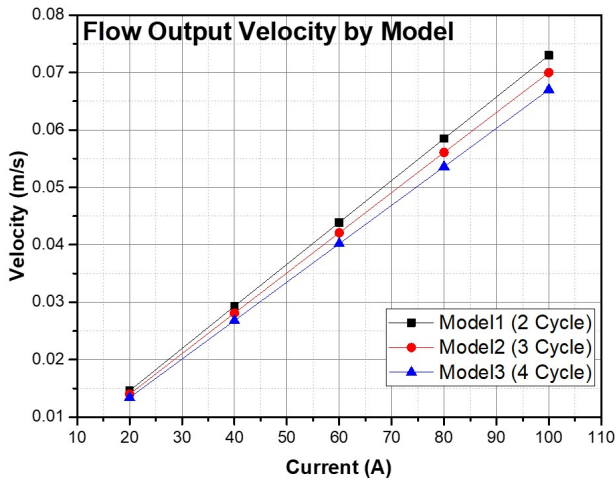


Fig. 6 Calculation result of maximum seawater flow-rate for the applied currents and pitch numbers at the exit stage of helical MHD thruster

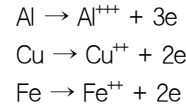
4.3 해수 전기화학적 반응

해수 중에 놓여있는 전극에 전압이 인가되어 전류가 흐르게 되면 해수의 전기분해가 유도된다 (Tempelmeyer, 1990a). 해수의 전기분해 과정에 대하여 전기화학적 반응에 관한 연구가 이전에는 시도된 바가 없지만, 일부 배경지식들로부터 다양한 전극재료와 여기에 발생하는 현상들을 이해하는데 도움을 받게 된다. 만약, 전극이 비활성(inert)이면, 아래의 반응에 의해 수용액인 NaCl의 전기분해로부터 양극(anode)에서 염소(Cl) 기체가 발생되고, 음극(cathode)에서는 수소(H) 기체가 발생된다:

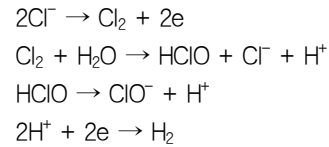
- 양극(Anode) : $2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$
- 음극(Cathode) : $2e^- + 2H_2O \rightarrow H_2 + 2(OH)^-$

음극에 있는 잔류 전자들은 음극에서의 화학적 감소(chemical reduction) 조건을 만들며, 양극에서의 전자 결핍(deficit of

electrons)은 산화(oxidation) 조건을 만들게 된다. 그러나, 양극 재료에 산화가 형성되면 아래의 반응과 같이 반응성 양극재료는 금속이 용해되는 것처럼 양극재료의 산화가 만들어지고, 재료손실(Material loss)이 발생한다:



그러므로, 해수 중에 흐르는 전류에 의해서 음극에는 수소기체(H₂)가 생성되고, 양극에서는 반응물질(reacting material)의 산화가 형성되어 재료손실(material loss)이 발생한다. 양극 표면에서 발생하는 염소(Cl)기체 생성반응이 전극 재료와 해수에 흐르는 전류량에 의존하며, 생성과 동시에 매우 빠르게 가수분해 되고, 아래의 반응에 의해 수소(H₂)가 추가로 생성된다 (Tempelmeyer, 1990a; Abdel-Aal et al., 2010):



MHD 추진기 내부에 있는 전극에 높은 전류가 흐르기 때문에 해수의 전기분해 현상이 발생되며, 이로 인해서 전극 표면에서는 기체방울(gas bubble)이 형성되고, 기체방울 소음(bubble noise)도 함께 발생하게 되는데, 이 소음에 관해서는 폭넓은 연구가 이루어지지 않고 있지만, 일부의 연구에 의해서 수~수십 kHz 정도의 주파수 대역을 나타내고 있다고 발표하였다 (Tempelmeyer, 1990b). 이러한 수~수십 kHz 주파수 대역의 수중소음이 MHD 추진기의 이용에 어떠한 영향을 미칠지에 대해서는 앞으로도 지속적인 연구가 필요한 상황이다. 특히, MHD 추진기 내부에서 발생하는 기체방울은 전극 표면과 해수의 전기화학적 반응에 의해서 형성되므로, 전형적인 함정의 프로펠러 고속회전에 의해서 형성되는 공동 기체방울(cavitation gas bubble)과는 발생기작(mechanism)과 소음 영향범위가 다를 수도 있다 (Lee et al., 2011; Paik et al., 2021; Kim et al., 2016).

4.4 해수추진 성능시험장치

한국원자력연구원(KAERI)에서는 국내에서 연구한 경험이 없는 헬리컬형(helical-type) MHD 해수 추진기 시험을 위한 소형 성능시험장치를 개발하였다. 소형 성능시험장치는 최대 0.6 T의 자기장 세기를 갖는 추진기로 내경 5 cm인 관로가 포함된 해수순환장치로 구성되어 있다(Fig. 7 참조). 헬리컬 추진기의 전·후단에는 길이가 35 mm인 유동유도기(flow guide)와 유동정류기(flow rectifier)를 설치하여 해수의 원활한 유동을 유도하였다. 성능시험장치의 전체길이는 약 2.1 m이고, 폭은 약 0.6 m이다. 양극(anode)의 직경은 6 mm인 봉(rod)으로 제작하였으

며, 음극(cathode)은 두께가 0.1 mm이고, 길이가 130 mm인 SUS316L 재료의 원통형 구조를 갖는다. 해수가 순환되는 관로는 내경이 5 cm인 투명 PVC로 제작하여 해수가 순환되는 것을 육안으로 확인할 수가 있다. 추진기 내부의 헬리컬형 절연구조(재료: ABS 또는 PETG)는 3-차원 인쇄(3-D Printing) 방식으로 만들었으며, 피치 길이가 100 mm이고, 양극이 해수에 노출되는 부분과 음극 원통의 길이는 130 mm로 음극 길이와 동일하다. 헬리컬 절연구조 양단에는 각각 35 mm 길이의 유동유도기(flow guide)와 유동정류기(flow rectifier)가 조립되어 있으며, 전산유체해석의 결과에 의해서 피치수 2로 제작되었다(Fig. 8 참조). 상전도 전자석과 추진기 내부전극에 전류를 인가하기 위한 DC 전원(2대)을 별도로 사용하였으며, 해수순환 관로의 추진기 전·후단에는 디지털 모니터링 형식의 유량계(속도계), 압력

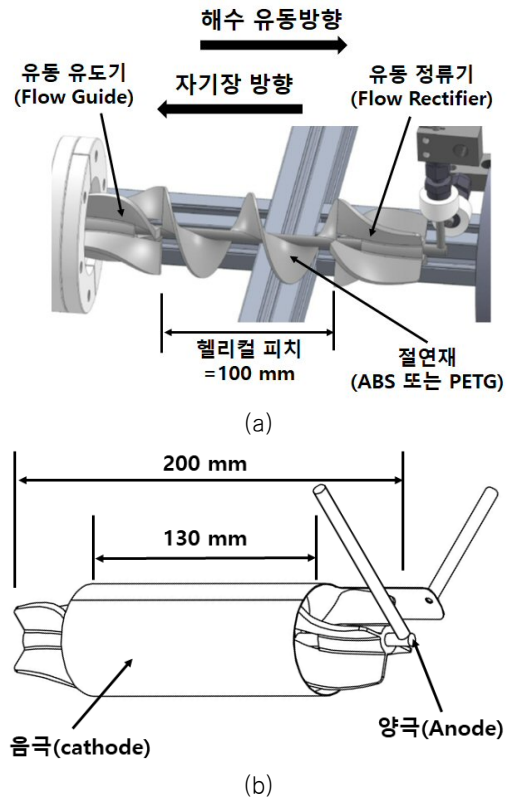
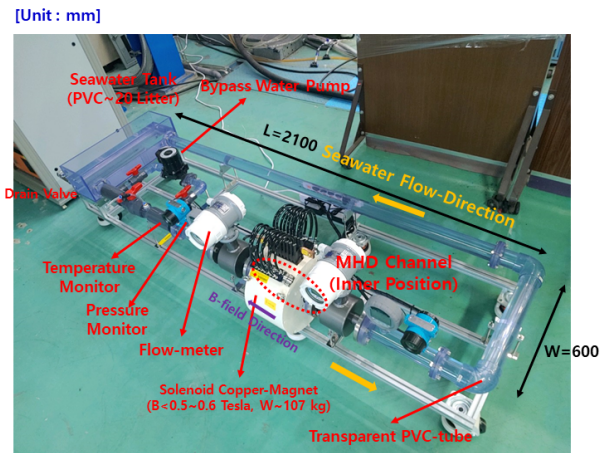
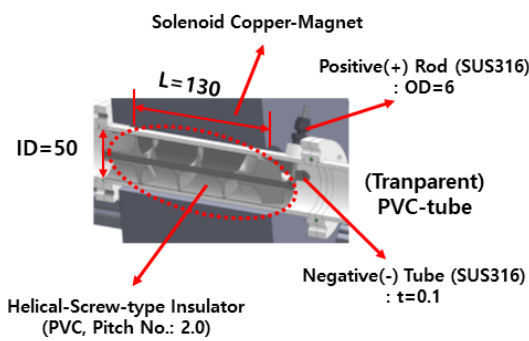


Fig. 8 Detailed internal structure of a helical-type MHD thruster in the small performance test device



(a)



(b)

- Magnetic Field Strength : 0.5~0.6 Tesla
- Electrode Material
 - Non-magnetized, Anti-erosion
 - Anode : SUS316L, Al-Alloy, Pt-coated Ti
 - Cathode : SUS316L
- Helical Insulator : PVC (ABS, PETG)
- (Artificial) Seawater : NaCl = ~5%
 - Conductivity = 5~6 S/m (0.17~0.2 Ohm·m)

Fig. 7 Small performance test device for the helical magnetohydrodynamic (MHD) seawater propulsion

계, 온도계를 각각 설치하여 순환되는 해수유동 변수들을 동시에 측정하였다. 특히, 양단의 전극에서 발생하는 기체 방울들을 제거하기 위해서, 전극에 특정한 전류를 인가한 후에는 소형 Bypass용 물펌프(water pump)를 사용하여 생성된 기체방울들을 배관 외부로 배출시킨 후에 다른 전류값을 전극에 계속 인가하는 과정을 반복하는 실험을 수행하였다.

4.5 추진성능 시험결과

자기장 세기가 0.6 T(전자석 코일에 인가한 전류/전압: 265 A/25 V)일 때, 해수추진 성능시험장치의 전극(양극, 음극) 양단에 인가하는 전류에 따른 해수 추진속도의 변화를 측정한 결과는 Fig. 9에서 보여주고 있다. 측정시험에서 인가한 전극 전류는 10~80 A이며, 이 때의 해수 추진속도는 0.03~0.42 m/s(0.06~0.84 Knot)를 나타내고 있다. 그리고, 80 A(전압=58 V)보다 높은 전류를 인가하는 경우에는 표면적이 음극보다 작은 양극에서 단위면적당 흐르는 전류값(A/m²)이 높아져서 전극 손상의 우려가 있기에 보다 높은 전류를 인가할 수는 없었다.

시험에서 사용한 양극(anode)의 3종류 재료(SUS316L, Al-7075 Alloy, Pt-coated(두께: 1~2 μm) Ti) 중에서 SUS316L과 Al-7075 Alloy는 해수와의 활발한 산화반응(oxidation reaction)에 의해서 전극에 심각한 재료손실(material loss)이 생겼으며, 해

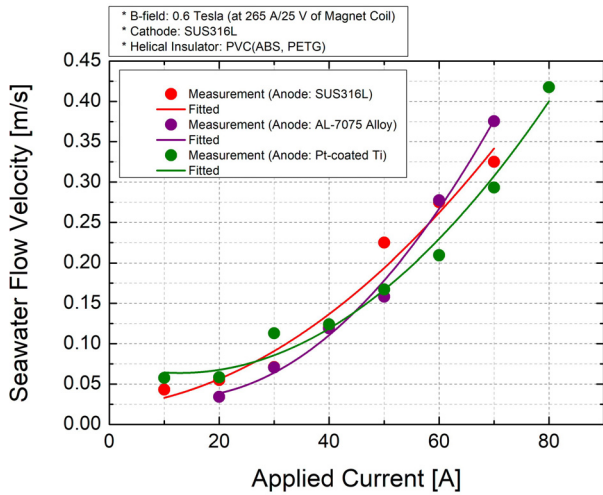


Fig. 9 Output seawater flow velocity along the applied current of electrodes for MHD thruster

수의 변색(각각 검정색과 짙은 회색)도 발생했다. 그러나, 다른 금속보다는 화학반응에 안정된 원소로 알려져 있는 Pt-coated Ti 전극은 해수의 색이 옅은 황색으로 변했으나 재료 손실은 전혀 발생하지 않았으므로, 향후 고자기장/고전류를 인가하는 추진시험에서는 Pt-coated Ti(또는 Ti-coated Pt) 전극을 사용하여 추진기 성능시험을 수행하고자 한다. 음극(cathode)에서는 재료손실(재질: SUS316L)이 전혀 발생하지 않았으므로, 음극 재료는 시험기간 동안에 계속해서 사용할 수 있었다.

전극에 인가하는 전류 10~80 A에 의한 추진시험으로부터 측정된 해수 추진속도는 계산으로부터 구한 해수 추진속도보다 약 4~8배 정도 높게 나타났다(Fig. 6과 Fig. 9 참조). 이 결과는 실험에서 사용한 헬리컬형 추진기의 입/출력단에 유동유도기(flow guide)/유동정류기(flow rectifier)를 설치하여 유동손실을 줄여서 해수 추진속도를 높여주려고 시도하였으나, CFD 해석에서는 이를 반영하지 않았음이 속도감소의 원인중 하나로 판단된다(Fig. 5와 Fig. 8 참조). 또한, 전자석에 인가하는 전류의 방향을 변경하여 자기장의 방향을 180도 전환시키면, 해수의 추진방향도 동시에 180도 바뀌는 역추진 결과를 확인하였으며, 이로부터 향후 MHD 추진기를 함정에 적용하는 경우에는 함정의 기동성 확보가 가능함을 확인하였다.

5. 결론

국외에서 개발중인 MHD 해수 추진기는 여러가지 구조적·동역학적 손실인자(loss factor)들로 인하여 효율증대에 어느 정도는 한계를 보이고 있다. 최근에는 MHD 추진기에서 필요한 고자기장을 얻기 위하여 솔레노이드 형태의 헬리컬형(helical-type) 전자석을 이용하고 있지만, 축-방향(axial direction)에 대한 자기장 분포의 불균일성으로 인하여 추진기 내부의 전극배열과 방해물(baffle) 등의 구조가 추진기효율에 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 방해물과 유도판(guiding plate)들의 추가적인 설치로 인하여 자기장

의 세기가 증가됨에 따른 추진기 내부의 수력학적 손실(hydrodynamic loss)도 함께 증가하게 된다. 국내에서도 2000년대에 들어서 중단된 MHD 선박 추진기 기술개발에 대한 연구를 다시 수행하여 MHD 추진기의 핵심기술들을 조속히 확보해야 한다.

국내에서는 지금까지 연구한 바가 없는 헬리컬형 추진기(helical-type thruster) 구조를 갖는 소형 성능시험장치를 자체 개발하여 해수 추진특성을 확인하였다. 전자석에 인가하는 전류의 방향을 변경하여 자기장의 방향을 전환하면, 해수의 추진방향도 동시에 전환되는 역추진 결과를 검증함으로써, MHD 추진기의 기동성 확보에 대한 가능성을 확인하였다. 또한, 다른 3종류의 재질로 만든 양극(anode)을 사용하여 추진시험을 수행함으로써, 후속 연구에서 수행하는 고자기장과 고전류의 MHD 추진시험에 필요한 전극재료의 기초자료를 확보하게 되었다.

후기

본 연구는 한국원자력연구원(KAERI) 자체사업 연구과제(79764-21)의 지원을 받아서 수행하였다.

References

- Abdel-Aal, H.K., Zohdy, K.M. & Kareem, M.A., 2010. Hydrogen production using sea water electrolysis. *The Open Fuel Cells Journal*, 3, pp.1-7.
- Cao, Q., Wang, Z., Fan, Y. & Cheng, Z., 2021. The effect of the conductance enhancement system based on capacitance deionization on the electromagnetic efficiency of the superconducting MHD thruster. *AIP Advances*, 11, pp. 125203-1~12.
- Chen, J. et al., 2019a. Feasibility analysis of helical superconducting MHD propulsor for naval vessels. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), pp. 3600407-1~9.
- Chen, X., Zhao, L. & Peng, A., 2019b. Effect of inlet flow-guide on hydraulic loss of seawater MHD propeller with helical channel. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1300* (3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications), pp.012053-1~7.
- Doragh, R.A., 1963. Magnetohydrodynamic ship propulsion using superconducting magnets. *Proceedings of Society of Naval Architects and Marine Engineerings Annual Meeting*. New York, pp.370.
- Doi, T. et al., 1968. Superconducting saddle shaped magnets. *Cryogenics*, pp.290-294.
- Ezzart, D.D., 1991. *Performance and flow characteristics of MHD seawater thruster*, ANL/CP-77194, DE91 006366 (The 3rd ONR Propulsion Meeting/Contractor's Review, Newport,

- Rhode Island, USA, October 15–18, 1990).
- Friauf, J.B., 1961. Electromagnetic ship propulsion. *Journal-American Society of Naval Engineers*, pp.139–142.
- Gilbert, J.B. & Lin, T.F., 1991. *Studies of MHD propulsion for undersea vehicles and seawater conductivity enhancement*. Annual Report (1 Feb. 1990 to 31 Jan. 1991), Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University.
- Haghparast, M. & Pahlavani, M.R.A., 2019. A comparative study on the performance of marine magnetohydrodynamic motors with helical and linear channels. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(11), pp.8205008–1~7.
- Haghparast, M., Pahlavani, M.R.A. & Azizi, D., 2019. Fully 3-D numerical investigation of phenomena occurring in marine magnetohydrodynamic thrusters. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(4), pp.1818–1826.
- Hales, P. et al., 2006. A solid-nitrogen cooled high-temperature superconducting magnet for use in magnetohydrodynamic marine propulsion. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 16(2), pp.1419~1422.
- Iwata, A., Saji, Y. & Sato, S., 1980. Construction of model ship ST-500 with superconducting electromagnetic thruster system. *Proceedings of the Eighth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC8)*: Genova, pp.775–784.
- Jeoung, C.Y., 1997. *Design study and performance test of a superconducting magnet system for MHD ship propulsion*. MS (Department of Physics), Pohang University of Science & Technology.
- Kim, C.N., 1991. A magnetohydrodynamic flow in a rectangular duct. *Annual Report of the KNIT*, 12, pp.9–17.
- Kim, T. et al., 2016. Numerical and experimental prediction methods of cavitation noise radiated by underwater propellers. *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*, 5–9 September, 2016: Buenos Aires.
- Kiyoshi, T. & Wada, H., 2003. Development of advanced high-field magnets at the Tsukuba magnet laboratory. *Journal of Low Temperature Physics*, 133(1/2), pp.31–40.
- Kong, Y.K., 1993a. An overview of magnetohydrodynamic ship propulsion with superconducting magnets. *Journal of Energy Engineering*, 2(1), pp.231–236.
- Kong, Y.K., 1993b. The performance analysis of direct current electromagnetic propulsion in seawater. *Journal of Energy Engineering*, 2(1), pp.38–44.
- Lee, C.M., Lee, S.J. & Sohn, Y.U., 1998. *An experimental on MHD flows using a superconducting magnet*. KSME 98S235, pp.494–499.
- Lee, J.W., Lee, S.J. & Lee, C.M., 1995. Numerical analysis and experimental investigation of duct flows of an MHD propulsion system. *Transactions of the Society of Naval Architecture of Korea*, 32(1), pp.83–93.
- Lee, P.H., Ahn, B.K., Lee, C.S. & Lee, J.H., 2011. An experimental study on noise characteristics of propeller cavitation inception. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), pp.1–7.
- Lin, T.F. & Gilbert, J.B., 1989. Studies of helical magnetohydrodynamic seawater flow in fields up to twelve teslas. *Navy News and Undersea Technology*, 6(46), pp.1–2.
- Liu, H.W., 2003. A new marine propulsion system. *Journal of Marine Science and Application*, 1(1), pp.30–34.
- Liu, X., Kiyoshi, T. & Takeda, M., 2006. Simulation of a seawater MHD power generation system. *Cryogenics*, 46, pp.362–366.
- Lodhi, M.A.K. & Dalogu, P.V.A., 2001. An overview of advanced space/terrestrial power generation device: AMTEC. *Journal of Power Source*, 103, pp.25–33.
- Motora, S., Takazawa, S. & Tamama, H., 1991. Development of the MHD Ship YAMATO-1. *Proceedings of Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's (IEEE OCEANS'91)*, pp.1636–1641.
- Nishigaki, K. et al., 2000. Elementary study on superconducting electromagnetic ships with helical insulation wall. *Cryogenics*, 40, pp.353–359.
- Paik, B.G. et al., 2021. An experimental study on the frequency characteristics of cloud cavitation on naval ship rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(3), pp.167–174.
- Pasha Publications (Arlington, VA), 1989. MHD sub propulsion system to be tested at argonne. *Navy News and Undersea Technology*, 6(46), pp.1–2.
- Peng, Y. et al., 2002. *Performance Analyses of Helical MHD Thruster in 14 Tesla*. AIAA2002–2173 (33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, 20–23 May, Maui, Hawaii, USA).
- Phillips, O.M., 1962. The prospects for magnetohydrodynamic ship propulsion. *Journal of Ship Research*, pp.43–51.
- Rodrigues, A.L., 1999. *Application of superconducting materials to magnetohydrodynamic thrusters for electrical ship propulsion*. R. Kossowsky et al.(edi.), Physics and Materials Science of Vortex States, Flux Pinning and Dynamics, Kluwer Academic Publishers (Printed in the Netherlands), pp.731–742.
- Saji, Y., Kitano, M. & Iwata, A., 1978. Basic study of superconducting electromagnetic thruster device for propulsion in seawater. *Advances in Cryogenic Engineering* (Timmerhans K. D. editor), 23, pp.159–169.
- Sohn, Y.U., Lee, C.M., Park, S.Y. & Kim, S.J., 1998. The study of a superconducting magnet for MHD ship propulsion. *KSME 98S237*, pp.506–511.
- Stumberger, G., Aydemir, M. T., Zarko, D. & Lipo, T. A., 2004. Design of a linear bulk superconductor magnet synchronous

motor for electromagnetic aircraft launch systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(1), pp.54-62.

Tada, E., Saji, Y., Kuroshi, K. & Fujinaga, T., 1984. Fundamental design of a superconducting EMT icebreaker. *Transactions of the International Marine Engineering Conference*, 97(Conference 3, Paper 6), pp.49-57.

Takeda, M. et al., 2005. Fundamentals studies of helical-type seawater MHD generation system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2), pp.2170-2173.

Takeda, M. et al., 2006. Basic characteristics of helical-type seawater MHD power generator with flow rectifier. *Review of the Faculty of Maritime Sciences* (in Japanese), 3, pp.107-113.

Takeda, M. et al., 2015. Effect of rectifier on characteristics of helical-type seawater MHD power generator. *Review of Graduated School of Maritime Sciences* (in Japanese), Kobe University, 12, pp.17-22.

Takezawa, S. et al., 1994. Sea trials of superconducting electro mgneto-hydrodynamic propulsion ship, "YAMATO 1". *Journal of the Kansai Society of Naval Architects* (in Japanese), 221, pp.77-82.

Takezawa, S. et al., 1995. Operation of the thruster for superconducting electromagnetohydrodynamic propulsion ship "YAMATO-1". *Bulletin of the Marine Engineering Society in Japan*, 23(1), pp.46-55.

Tempelmeyer K.E., 1990a. *Electrical characteristics of a seawater MHD thruster*. DTRC-90/017 (David Taylor Research Center), June 1990.

Tempelmeyer K.E., 1990b. *Electrolysis bubble noise in small-scale tests of a seawater MHD thruster*. DTRC-90/30 (David Taylor Research Center), September 1990.

Way, S., 1968. Electromagnetic propulsion for cargo submarine. *Journal of Hydronautics*, 2(2), pp.49-57.

Yan, L. et al., 2002. *Results from 14 T superconducting MHD propulsion experiment*, AIAA2002-2172 (33rd Plasmadynamics and Lasers Conference), 20-23 May 2002: Maui (Hawaii, USA).

Yan, L.G. & Lin, L.Z., 1995. Recent progress of applied superconductivity in China. *Cryogenics*, 35(12), pp.843-851.

Zhao, L.Z. et al., 2012. *Numerical analysis on a helical-channel seawater MHD generator*. IEEE PES ISGT ASIA 2012.

